Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.48-73

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.75157.1171 Open access

Modeling of land subsidence of Salmas plain by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)

Maryam Bayati Khatibi[a*], Ruhullah Mohammadzadeh[b] , Sadra Karimzadeh[c]

[a]Professor in Geomorphology, Department of RS & GIS, Faculty of Planning and Environment sciences, University of Tabriz ,Tabriz,Iran.
[b]M.S.Student in RS & GIS , Department of RS & GIS, Faculty of Planning and Environment sciences. University of Tabriz ,Tabriz,Iran.
[c]Assistant Professor in RS & GIS . Department of RS & GIS, Faculty of Planning and Environment sciences, University of Tabriz ,Tabriz ,Iran.

Received: 27 March 2024 ***Revised: 11 June 2024*** ***Accepted: 15 June 2024***

Extended Abstarct

Introduction

Salmas Plain is one of the important agricultural regions of West Azerbaijan province, playing a significant role in the region's agriculture and development. In recent decades, the plain has been severely impacted by the phenomenon of subsidence due to the over-extraction of groundwater from aquifers. Therefore, identifying areas prone to subsidence in the Salmas Plain is of particular importance for the management and control of this phenomenon. In this study, a fuzzy neural inference system model was used to predict subsidence-prone areas. To achieve this goal, seven important factors contributing to subsidence in the region were analyzed: land slope, digital elevation model, vegetation, groundwater depth, distance from roads, distance from rivers, and distance from piezometric wells. The information related to these factors was collected in ArcGIS software and transferred to MATLAB software for model implementation. Using the C-fold CV method, the data were randomly divided into three groups: 70% for training, 20% for testing, and 10% for validation. These data were introduced to MATLAB for training, testing, and validation. The data were accurately trained and validated, achieving a precision of 10^{-8}. Several different membership functions, including trapezoidal, triangular, Gaussian, two-sided Gaussian, and bell

* . Corresponding author: Maryam Bayati Khatibi Email:m_bayati@tabrizu.ac.ir Tel:+989144159421

How to cite this Article: Bayati khatibi, M. , Mohammadzadeh, R. , & Karimzadeh, S. (2024). Modeling of land subsidence of Salmas plain by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(4) ,48-73

curve functions, were tested in the model. The results showed that the trapezoidal membership function, with a regression correlation coefficient of 0.86, and the Gaussian membership function, with a regression correlation coefficient of 0.81, performed best in identifying areas prone to subsidence.
Based on the results, the eastern areas and the outlet of the plain have experienced significant drops in groundwater levels and subsidence. Statistical studies also revealed that groundwater levels have dropped by over 18 meters, averaging 1.23 meters per year in recent years. The crisis has been exacerbated over the past two decades by over-extraction of groundwater for agriculture, combined with a storage-to-recharge ratio of 0.03% and unfavorable climatic conditions. The spatial pattern of land subsidence in Iran indicates that this phenomenon is strongly linked to the uncontrolled abstraction of groundwater resources, driven by increasing urban water consumption and low agricultural water efficiency. Drought conditions and excessive groundwater withdrawal have not only affected arid and central regions of the country but have also extended to semi-arid and humid areas in the northwest. Geological experts have reported that 300 out of 600 plains in the country are affected by subsidence. Due to the importance of this issue, many researchers have studied land subsidence. Their results indicate that the Salmas Plain, as part of the Lake Urmia catchment area, is experiencing a major subsidence crisis. This crisis has caused significant problems for infrastructure in many parts of the Salmas Plain, especially in the Qara Gheshlagh region. The main cause of subsidence is the over-extraction of water from wells constructed for agricultural purposes, which has led to a steady decline in the volume of aquifers.

Material and Methods

To evaluate the susceptibility of the Salmas Plain to subsidence, the required data and statistics up to 2019 (1398 in the Iranian calendar) were collected as follows:

- Digital topographic maps (1:25,000 scale), a digital geological map (1:100,000 scale) of Salmas city, and thematic maps (e.g., slope, land use, geology, distance from wells, groundwater depth, distance from rivers, and distance from faults).
- GPS data, meteorological information, soil maps, and aerial photographs (1:20,000 scale).
- Digital Elevation Model (DEM) with a resolution of 30 x 30 meters.
  In this study, seven criteria were analyzed: vegetation type, groundwater depth, distance from roads, distance from rivers, distance from piezometric wells, digital elevation model, and slope. All criteria were first standardized in ArcGIS software and converted into an 800 x 800-meter grid. The data from each grid were then compiled into a matrix and transferred to MATLAB for analysis using the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) model.
  To ensure accurate modeling, the satellite data were divided into three parts: 70% for training, 20% for testing, and 10% for validation. This process ensured precise measurement of modeling accuracy and error rates using MATLAB software.

Results and Discussion

Studies revealed that over the past 41 years, groundwater levels in the Salmas Plain have dropped by 18 meters, averaging 1.23 meters per year from 2014 to 2015 (93-94 in the Iranian calendar). The plain, characterized by clay and silty layers, has experienced significant aquifer compression and reduced porosity due to over-extraction of

groundwater. This has resulted in land subsidence across the study area. The model results demonstrated that trapezoidal and triangular membership functions performed best, achieving error coefficients of 10^{-7} and 10^{-8}, with mean error rates of 0.18 and 0.20, respectively. The regression correlation coefficients were 0.86 and 0.80, confirming the model's accuracy in identifying areas of high subsidence sensitivity. Approximately 8.9 and 6.3 square kilometers of the plain were classified as very high-risk areas, while 1.8 and 3.2 square kilometers were classified as high-risk zones. These findings indicate that the proposed model can effectively predict subsidence with high accuracy and reliability.

Furthermore, the results highlight that over-extraction of groundwater has caused aquifer compaction and subsidence. Linear regression analysis confirmed the model's accuracy, with a correlation coefficient of 0.86.

Conclusion

The Salmas Plain is a vital agricultural region where groundwater serves as the primary water source. Over 70% of extracted groundwater is used for agriculture. Irregular groundwater extraction and reduced rainfall have significantly lowered groundwater levels, exacerbating subsidence in the plain. Since 1993, the annual water table drop has increased to 1.23 meters. The fuzzy neural inference system model demonstrated that trapezoidal and triangular membership functions with regression correlations of 0.86 and 0.81 provided reliable results, predicting subsidence-prone areas effectively. The findings suggest that 8.6% and 6.3% of the study area are at very high risk of subsidence. Immediate measures are required to control groundwater extraction and manage the subsidence crisis in the Salmas Plain.

Key Words: Land Subsidence, Groundwater Depletion, ANFIS Model, Salmas Plain, West Azerbaijan

How to cite this Article: Bayati khatibi, M. , Mohammadzadeh, R. , & Karimzadeh, S. (2024). Modeling of land subsidence of Salmas plain by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(4) ,48-73

جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۷۳-۴۸
ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076
نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی
مقاله پژوهشی
DOI: 10.22067/geoeh.2024.75157.1171
دسترسی آزاد

مدل‌سازی فرونشست زمین در دشت سلماس (آذربایجان‌غربی) با استفاده از ANFIS

مریم بیاتی خطیبی[1]– استاد ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
روح‌الله محمد زاده – دانش‌آموخته سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
صدرا کریم زاده– استادیار سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ **دریافت:۱۴۰۳/۱/۸** **تاریخ بازنگری:۱۴۰۳/۳/۲۲** **تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۳/۲۶**

چکیده

دشت سلماس از محدوده‌های مهم کشاورزی شمال غرب کشور و استان آذربایجان غربی، محسوب می‌شود. این دشت در دهه‌های اخیر، به لحاظ برداشت بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی دچار بحران شدید فرونشست زمین شده است. شناسایی مناطق مستعد فرونشست در محدوده دشت سلماس، از دیدگاه شناخت علت وقوع، مدیریت و کنترل پدیده فرونشست و همچنین جلوگیری از فرسایش خاک، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، با هدف بررسی علل و ابعاد فرونشست زمین و همچنین پیش‌بینی مناطق مستعد به فرونشست، از مدل سیستم استنتاج عصبی فازی و برای رسیدن به هدف، از هفت عامل تأثیرگذار در پدیده فرونشست دشت (شامل: شیب زمین، ارتفاع، پوشش گیاهی، آب‌های زیرزمینی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه و فاصله از چاه‌های پیزومتری) استفاده شد. در روند تحقیق، اطلاعات جمع‌آوری شده به محیط ArcGis وارد و برای پیاده‌سازی مدل به نرم‌افزار متلب منتقل گردیدند و با استفاده از روش C-flodCV داده‌ها با دقت 10^{-8} آموزش و اعتبار سنجی شدند. داده‌ها در چند تابع عضویت مختلف، شامل توابع عضویت ذوزنقه‌ای، مثلثی، گوسی، گوسی دو طرفه و تابع زنگوله‌ای مدل‌سازی شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد تابع عضویت ذوزنقه‌ای با ضریب همبستگی رگرسیون ۰.۸۶ و تابع عضویت گوسی با ضریب همبستگی رگرسیون ۰.۸۱ بهترین عملکرد را در شناسایی مناطق مستعد فرونشست دارند. با توجه به نتایج مطالعات در دشت سلماس، می‌توان گفت در طی سال‌های موردبررسی، مناطق شرقی و خروجی دشت با افت زیاد آب‌های

[1] .نویسنده مسئول : ۰۹۱۴۴۱۵۹۴۲۱ Email:m_bayati@tabrizu.ac.ir

زیرزمینی و متعاقب آن با پدیده فرونشست مواجه شده‌اند. همچنین بررسی‌های آماری نشان داد در بازه زمانی موردبررسی، آب‌های زیرزمینی در کل بیش از ۱۸ متر افت سطح ایستابی داشته‌اند و این افت به‌طور متوسط در هر سال ۱.۲۳ متر گزارش شده است. در دو دهه گذشته، با محاسبه ضریب ذخیره یا تغذیه ۰.۰۳ درصدی و شرایط خشکی اقلیمی و افزایش سطح زیر کشت، این بحران در سال‌های اخیر به‌شدت تشدید شده است.

کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، افت سطح آب زیرزمینی، مدل ANFIS, دشت سلماس، آذربایجان غربی.

۱- مقدمه

پدیده فرونشست زمین از پیامدهای مدیریت نامناسب آب و زمین در محدوده‌های کم آب محسوب می‌شود. در کشورهایی مانند ایران که بهره‌برداری از منابع زمین بدون در نظر گرفتن توان‌های اکولوژیکی صورت می‌گیرد، در چنین محدوده‌هایی، مهم‌ترین واکنش زمین به تخلیه بی‌رویه آب‌های زیرزمینی فرونشست زمین است. با توجه پیامدهای خطرناک این پدیده از آن به‌عنوان مخاطره یاد می‌شود. امروزه، بر خلاف گذشته که مخاطرات ناشی از مدیریت نادرست آب که غیرقابل‌پیش‌بینی و پیشگیری متصور می‌شد، می‌توان با درک به‌موقع از میزان افت آب‌های زیرزمینی، خطر فرونشست زمین و روند رو به بحران را کاملاً پیش‌بینی نمود. فرونشست زمین هرچند که گاه یک پدیده زمین‌شناسی ناشی از دخالت عوامل طبیعی یا گاه یک پدیده رخداده ناشی از دخالت فعالیت‌های انسانی است، اما وقتی در اثر این پدیده، خاک قابل‌کشت و یا زمین در محدوده‌های سکونتگاهی مورد هدف قرار می‌گیرند، از مخاطرات جدی محسوب می‌شوند (Galloway et al., 1998). فرونشست طبق تعریف سازمان زمین‌شناسی ایالت متحده امریکا[1]شامل پایین رفتن یا نشست روبه پایین سطح زمین است که می‌تواند با جابجایی افقی اندکی همراه باشد (Amelung, Galloway, Bell, Zebker & Laczniak, 1999; Ganguli, 2011, Zarei, Rasoulzadeh, Seddighi, Ahmadzadeh & Ramezani, 2020). عوامل مؤثر در وقوع این پدیده مختلف و متعدد هستند که برخی از این عوامل، می‌تواند شامل زمین‌لرزه‌ها و حرکت پوسته زمین، ذوب یخچال‌های طبیعی، فعالیت‌های انسانی و البته، استحصال بی‌رویه از منابع زیرزمینی باشد (Dehghani, Rastegarfar, Ashrafi, Ghazipour &

[1] The United States Geological Survey

(Khorramrooz, 2014). بیش از ۸۰٪ از علت فرونشست‌ها در دنیا و ایران، ناشی از استحصال بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است (Galloway et al., 1998).

پدیده فرونشست می‌تواند اثرات مورفولوژیکی سطحی بی‌شماری مانند، بی‌نظمی‌های مورفولوژیک، خسارت به تأسیسات انسان‌ساخت، باند فرودگاهی، شبکه‌های آب‌رسانی بخش کشاورزی و کاهش حجم آبخوان‌ها (Chen, Wang, Hsu, Yu & Kuo, 2010; Burbey, 2002; Lashkaripour, Ghafoori & Rostami, Barani, 2009)، اختلال در الگوی جریان‌های هیدرولوژیک، تداخل آب شیرین و شور (Chen et al., 2010) را به دنبال داشته باشد (Cassiani & Zoccatelli, 2000). در سال‌های اخیر وقوع فرونشست زمین در محدوده‌هایی با بهره‌برداری شدید از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌های متشکل از نهشته‌های آبرفتی که به‌خوبی تحکیم نیافته‌اند، بیشتر شده است. شواهدی زیادی از وقوع فرونشست در بسیاری از دشت‌های ایران ازجمله یزد، کاشمر گزارش و مشاهده شده است (Lashkaripour et al., 2009). پدیده فرونشست، که عمدتاً ناشی از برداشت بیش‌ازحد مجاز آب‌های زیرزمینی همراه با فشرده شدن لایه‌های رسی و سیلتی میان آبخوان‌ها صورت می‌گیرد، غیرقابل‌بازگشت بوده و در این محدوده‌ها، بالا آمدن مجدد سطح ایستابی به تراز اولیه امکان‌پذیر نمی‌شود (Nilzad, Moradi & Jalili, 2018). الگوی فضایی پدیده فرونشست زمین در ایران حاکی از این است که پدید فرونشست بیشتر با برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، به سبب توسعه روزافزون مصرف آب در مناطق شهری و راندمان اندک آب در کشاورزی در رابطه است. تشدید شرایط ناشی از خشک‌سالی و فراگیری فضایی آب، علاوه بر نواحی خشک و مرکزی کشور، نواحی نیمه‌خشک و مرطوب شمال غرب را نیز تحت تأثیر قرار داده است. به‌طوری‌که برخی از مدیران و کارشناسان سازمان زمین‌شناسی، حدود ۳۰۰ دشت از ۶۰۰ دشت کشور را در معرض فرونشست اعلام نموده‌اند (Niroumandfar, khozeymehnehad & Khashei Siuki, 2020). با توجه به اهمیت فرونشست زمین و پیامدهای آن، مطالعه در مورد این پدیده توسط محققین زیادی صورت گرفته است. کریم زاده و متسوکا (Karimzadeh & Matsuoka, 2020) در مطالعه‌ای جابجایی زمین در استان آذربایجان شرقی و غربی را با استفاده از داده‌های ماهواره ALOS-2، تصویر PALSAR-2 باند L در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ را

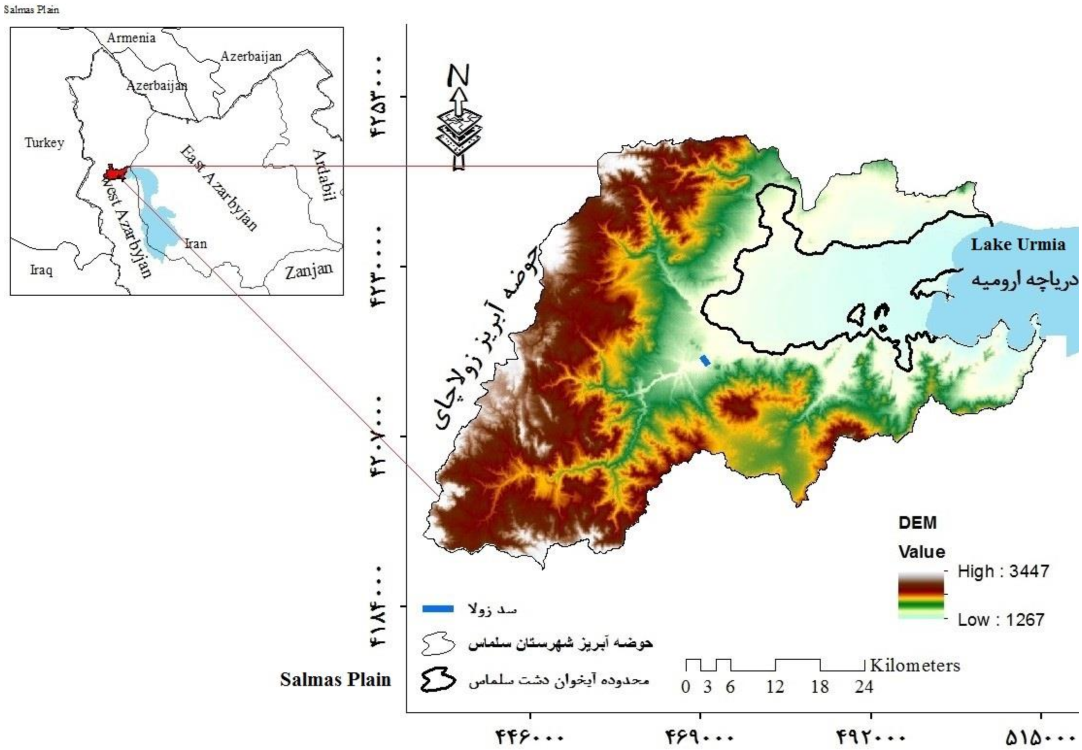
موردبررسی قراردادند. نتایج مطالعات نشان داد که دشت‌های تبریز و شبستر با پدیده جدی فرونشست مواجه هستند.

دشت سلماس به‌عنوان بخشی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه، که امروزه با بحرانی به نام فرونشست زمین مواجه است، به‌عنوان مهم‌ترین محدوده کشاورزی شمال غرب کشور محسوب می‌شود. این بحران در بسیاری از نقاط دشت سلماس، به‌خصوص منطقه قره قشلاق مشکلات فراوانی را برای سازه‌های انسانی ایجاد کرده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته دشت سلماس در طول دو دهه با کاهش حجم آبخوان‌ها مواجهه بوده است، که علت اصلی آن هم برداشت آب از طریق چاه‌های متعددی بوده، که به‌طور خاص برای مصارف کشاورزی احداث گردیده‌اند. این تعدد و استفاده زیاد از آب‌های زیرزمینی باعث فرونشست زمین در این محدوده شده است. نادرلو و همکاران (Naderloo, Javadikia & Mostafaei, 2017) به بررسی هیدرولوژی آبخوان دشت سلماس با تأکید بر فرونشست زمین پرداختند که در این پژوهش از ترکیب روش نگاشت خودسازمانده (SOM) و مدل‌های مختلف هوش مصنوعی نظیر منطق فازی (FL) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی استفاده کرده‌اند و درنهایت برای به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر، مدل هوش مصنوعی مرکب نظارت شده (SCMAI) برای ترکیب نتایج مدل‌های منفرد به کار برده شد و درنهایت به این اصل رسیده‌اند که وضعیت محدوده بسیار بحرانی است. زارعی و همکاران (Zarei et al., 2020) با استفاده از تصاویر راداری، میزان فرونشست در دشت سلماس در سال ۲۰۰۹ در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا۲۰۱۸ را به ترتیب ۱۱ سانتی‌متر و تا ۶۰ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند.آنچه از پیشینه مطالعات نتیجه می‌شود، این است که فرونشست در دشت سلماس مسئله بسیار جدی است و به مطالعات زیاد و مستمر نیاز دارد.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-محدوده موردمطالعه

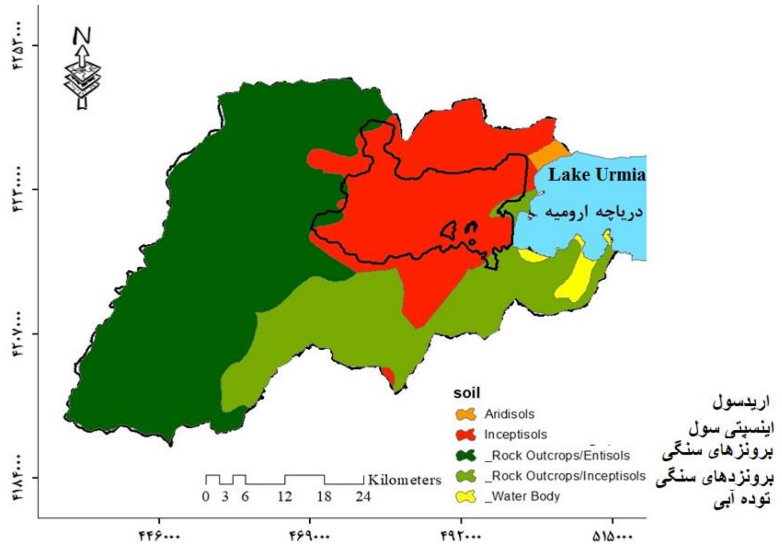
دشت سلماس به‌عنوان بخشی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه، در شمال استان آذربایجان غربی، بین محدوده ' ۲۷ ° ۴۵ تا ' ۰۶ ° ۴۴ طول شرقی و' ۱۱ ° ۳۸ تا ' ۳۱ ° ۳۸ عرض شمالی قرارگرفته است. محدوده مطالعاتی با حدود ۵۵۰ کیلومترمربع وسعت، در قسمت شرق رشته‌کوه زاگرس قرارگرفته است و از اطراف به‌وسیله تراس‌ها و تپه‌های بلند کوهستانی احاطه شده و از قسمت شرق نیز به دریاچه ارومیه ختم می‌گردد (شکل ۱). یکی از منابعی که آب زیرزمینی قسمت‌های جنوبی دشت سلماس (اطراف آغ زیارت) را تغذیه می‌کند، چشمه‌ی آبگرم واقع در ۱/۵ کیلومتری روستای آبگرم سلماس می‌باشد. آب این چشمه گرم که دبی پایینی هم دارند، وارد رودخانه می‌شوند و درنهایت پس از عبور از قسمت‌های جنوبی دشت سلماس به مراتع اطراف دریاچه ارومیه تخلیه می‌گردد. دشت سلماس، دشتی مسطح با متوسط ارتفاع ۱۳۰۰ متر و با شیب ملایم کمتر از پنج درصد است که شیب دشت از غرب به شرق و دریاچه ارومیه می‌باشد. تقریباً تمام دشت مذکور دارای کاربری زراعی و باغی است. خاک در این دشت عموماً از نوع خاک‌های این سپتی سول، با منشأ نسبتاً جدید است. این نوع خاک‌ها دارای زهکشی مناسب و قابل‌کشت می‌باشد. خاک اریدیسول بیشتر در بخش‌های شرقی دشت و در نزدیکی سواحل دریاچه ارومیه دیده می‌شود که دارای مقادیر نمک بوده و از لحاظ کشاورزی کارایی ندارد (شکل ۲).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده موردمطالعه

Fig.1. Geographical location of the study area

قدیمی‌ترین سنگ‌های رخنمون یافته در منطقه شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی است. واحدهای متعلق به کرتاسه (شیل، ماسه و آهک) نیز با درجه‌ی دگرگونی ضعیف در منطقه حضور دارند. ملانژ افیولیتی که شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین و رسوبی دگرگون شده (در حد رخساره شیست سبز) است، در نیمه شمالی منطقه گسترش دارد. واحدهای میوسن در منطقه دربرگیرنده‌ی ماسه‌سنگ، کنگلومرا، شیل و مارن با عدسی‌هایی از سنگ‌آهک و گچ است. این واحدها توسط گدازه‌ها و سنگ‌های آذرآواری حاصله از فعالیت آتشفشانی کواترنر و آبرفت‌های کواترنری پوشیده شده‌اند. سنگ‌های آذرین بیشتر در قسمت غرب منطقه قرار دارند که از نوع اسیدی و بازی بوده و سنگ‌های بازالتی در قسمت جنوب غربی به‌صورت وسیعی گسترش دارند و این قسمت را نسبتاً قابل‌نفوذ ساخته‌اند. در اطراف دریاچه ارومیه سنگ‌های آذرین اسیدی که دارای مقدار زیادی کوارتز هستند، به رنگ گلی روشن و آجری دیده می‌شوند (Rajabi & Bayati, 2011).



شکل ۲- ویژگی خاک‌ها و سازنده‌ای سطحی دشت سلماس

Fig.2. Characteristics of soils and surface formations of Selmas Plain

۲-۲-روش انجام پژوهش

فرونشست زمین متأثر از عوامل مختلف انسانی و طبیعی است، لذا بررسی حساسیت زمین به فرونشست، بستگی به نقش و میزان و سهم پارامترهای مختلف در پدید آمدن چنین مخاطره‌ای دارد. لازمه مطالعه دقیق فرونشست، دسترسی به اطلاعات و آمار کافی از منابع مختلف است. در این مطالعه برای بررسی میزان حساسیت دشت سلماس نسبت به پدیده فرونشست، آمار و اطلاعات موردنیاز تا سال ۱۳۹۸ به شرح زیر گردآوری شده است:

نقشه‌های توپوگرافی رقومی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه زمین‌شناسی رقومی ۱/۱۰۰۰۰۰ شهرستان سلماس، تهیه نقشه‌های پایه و موضوعی مانند (شیب، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از چاه‌ها، عمق آب‌های زیرزمینی، فاصله از رودخانه و فاصله از گسل و سایر نقشه‌ها برحسب نیاز)، استفاده از دستگاه سیستم موقعیت‌یابی جهانی(GPS)، داده‌های هواشناسی منطقه، نقشه خاک، عکس‌های هوایی مقیاس ۲۰۰۰۰ :۱، DEM منطقه موردمطالعه ۳۰ * ۳۰ متری. در این مطالعه، از مدل‌های مانند، مدل فازی تعیین درجه عضویت Membership، مدل همپوشانی فازی Fazzy Overlay، مدل شبکه عصبی Neuro Network، سیستم

استنتاج عصبی–فازی تطبیقی (ANFIS)[1] بهره‌گیری شده است. برای بررسی فرونشست در دشت سلماس، از هفت معیار مختلف، شامل نوع پوشش گیاهی، عمق آب‌های زیرزمینی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، فاصله از چاه‌های پیزومتری، مدل رقومی ارتفاع و شیب استفاده شده است. برای بررسی این عوامل در فرونشست زمین، در ابتدا تمام معیارها در نرم‌افزار ArcGis استانداردسازی شده و به شبکه‌هایی با ابعاد ۸۰۰*۸۰۰ متر، به مرکزیت نقاط تبدیل و تمام اطلاعات مربوط به هفت معیار در هر شبکه در نقاط مرکزی قرار داده شد. سپس اطلاعات توصیفی نقاط را به ماتریس تبدیل کرده و برای اعمال روش ANFIS به نرم‌افزار متلب (Matlab) انتقال یافت. برای کل فرایند ANFIS به سه نوع داده نیاز بود و داده‌ها باید به‌صورت تصادفی، نمونه‌برداری می‌شدند. به این منظور، روش C-flodCV برای تقسیم داده‌های موجود به سه قسمت آموزشی، آزمایشی و داده‌های چک یا اعتبار سنجی اجرا شد. اطلاعات توصیفی لایه‌های مذکور، به‌صورت ماتریس به محیط نرم‌افزار متلب منتقل گردید. در این ماتریس، ستون اول به میدان مشترک برای همه لایه‌ها اختصاص یافت تا ساختار نقشه‌ها حفظ شوند. در ادامه ستونی به ماتریس تحت عنوان مناطق فرونشست اضافه شد که مقادیر آن بین یک و صفر متغیر است. شایان‌ذکر است که هر چه این عدد به سمت یک سیر کند نشان از فرونشست در پیکسل است (و برعکس). در این بررسی، داده‌های آموزشی در محیط متلب وارد شد و سپس در بین انواع توابع فازی، توابع عضویت مدنظر را انتخاب و سپس تعداد توابع فازی نیز وارد شدند. با تعیین تکرار آموزش گزینه Train را انتخاب و داده‌های آموزش داده شده را تست کرده و سپس داده‌های آموزشی را در فرایند مدل تعریف گردید. در ادامه، با تکیه به قوانین و توابع تعیین شده برای داده‌های آموزشی، فرایند آزمایش انجام گرفت. در ادامه با استفاده از سیستم استنتاج فازی تولید شده و قوانین مربوط به آن، با دستور evalfis فرونشست زمین پیش‌بینی گردید. در این تحقیق، برای اعتبار سنجی از روش CflodCV استفاده شد. داده‌هایی که برای استخراج مدل Anfis به نرم‌افزار متلب معرفی شده بودند، دامنه بسیار زیادی داشته‌اند و با توجه به اینکه این امر بر مدت‌زمان پردازش، آموزش داده‌ها و کاهش میزان خطا در آموزش تأثیرگذار است، بنابراین در محیط نرم‌افزار متلب با ارائه کدنویسی و تعریف function مقادیر داده‌ها را بین صفر و یک قرار داده شد و در محیط نرم‌افزار متلب ابتدا ماکزیمم و مینیمم

---

[1] Adaptive Neuro- Fuzzy Inference System

داده‌ها را محاسبه، سپس شرط برای نرمال‌سازی ارائه گردید. در ادامه حداقل (LB) و حداکثر (UB) بین صفر و یک تعریف شدند. بعد از این عملیات داده‌های نرمال با معادله (۱) به‌دست آمد:

$$\text{Normalization}= (UB - LB) * X - LB \quad (۱)$$

در این مطالعه، با نرمال‌سازی داده‌ها دامنه کوتاه‌تر شد و آموزش داده‌ها هم به لحاظ زمان و هم از لحاظ خطا، عملکردی بهتری نشان دادند و درنهایت خطا به $۱۰^{-۸}$ کاهش یافت.

۲-۲-۱- مدل‌سازی با ANFIS بر پایه FIS

در این تحقیق برای مدل‌سازی با Anfis، داده‌ها تقسیم‌بندی گردیدند و در این تقسیم‌بندی، حدود ۷۰ درصد از داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزشی،۲۰ درصد از داده‌های باقی‌مانده به‌عنوان داده‌های آزمایشی یا وارسی و ۱۰ درصد دیگر به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی مدل‌سازی تعریف گردیدند. برای اجرای آموزش در FIS، روش بهینه‌سازی hybrid، با تعداد دوره‌های آموزش (۴۰ تکرار و خطای مورد نظر ۰) در نظر گرفته شدند. مشخصات کامل مدل ANFIS به کار رفته در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات مدل Anfis برای مدل‌سازی فرونشست

Table 1- Specifications of ANFIS model for subsidence modeling

خروجی Output	تکرار Repeat	عملگر محاسباتی Arithmetic Operator	الگوریتم آموزشی Learning Algorithm	ورودی Input
خطی Linear	40	تی-نرم T-Soft	هیبرید Hybrid	DEM
خطی Linear	40	تی-نرم T-Soft	هیبرید Hybrid	شیب Slope
خطی Linear	40	تی-نرم T-Soft	هیبرید Hybrid	فاصله از رودخانه Distance from river
خطی Linear	40	تی-نرم T-Soft	هیبرید Hybrid	فاصله از جاده Distance from Road
خطی Linear	40	تی-نرم T-Soft	هیبرید Hybrid	فاصله از چاه Distance from Well
خطی Linear	40	تی-نرم T-Soft	هیبرید Hybrid	پوشش سطحی Surface Cover
خطی Linear	40	تی-نرم T-Soft	هیبرید Hybrid	عمق آب Water depth

برای بیان مجموعه‌های گسسته فازی از معادله (۲) استفاده شده است.

$$\text{متغیر فازی} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\mu(a_i)}{a_i} \quad (۲)$$

در رابطه ۲، مؤلفه‌های، a_i، i امین عضو از مجموعه؛ $\mu_{(a_i)}$ درصد تعلق a_i به مجموعه فازی؛ n تعداد اعضای فازی (rmaghani et al., 2015aفازیJa).

جدول۲- توابع عضویت، خطا دوره آموزش، معیارهای آماری همبستگی و انحراف از میانگین مربعات

Table 2- Membership functions, training period error, statistical measures of correlation and deviation from mean square

توابع عضویت Membership Functions	خطای دوره اول First Period Error	خطای دوره دوم Second Period Error	خطای دوره سوم Third Period Error	RMSE	R^2
Tir mf	0.0000002	0.0000002	0.0000001	0.18	**0.86**
Trap mf	0.00000004	0.00000003	0.00000003	0.20	**0.81**
Gaussi mf	0.0000002	0.0000001	0.0000001	0.55	**0.29**
Gaussi mf2	0.00000004	0.00000003	0.00000003	0.55	**0.22**
Gbell mf	0.0000001	0.0000001	0.0000001	0.71	**0.12**

در جدول ۳ به دو روش استنتاج فازی شامل روش‌های ممدانی و سوگنو اشاره شده است که تفاوت زیادی با هم ندارد و در پایان یک جواب تقریباً یکسان ارائه می‌دهند.

جدول۳- روش‌های استنتاج فازی با عملگرهای فازی

Table 3- Fuzzy inference methods with fuzzy operators (Jahed Armaghani et al., 2015b)

روش	T.S.K	Mamdani
AND	$\boldsymbol{min}(\mu_A, \mu_B)$	$(\mu_A * \mu_B)$
OR	$\boldsymbol{max}(\mu_A, \mu_B)$	$\boldsymbol{max}(\mu_A, \mu_B)$
NOT	$\mathbf{1} - \mu_A$	$\mathbf{1} - \mu_A$

تابع مشخصه در مجموعه‌های فازی، دارای هر مقدار بین ۰ و ۱ باشد. درصورتی‌که مقادیر تابع عضویت فقط به دو مقدار ۱ یا ۰ محدود شود آنگاه A یک مجموعه کلاسیک[1] و یک تابع مشخصه خواهد بود. مجموعه‌های فازی در نرم‌افزار متلب قابل‌تعریف می‌باشند و دارای انواع متنوعی هستند که در این پژوهش از حالات ذوزنقه‌ای و مثلثی استفاده شده است. تابع **عضویت** ذوزنقه‌ای[2] که در این تحقیق از آن استفاده شده است با ۴ پارامتر {a b c d} به دو صورت زیر قابل‌تعریف می‌باشد.

$$f_{(x;a\,b\,c\,d)} = \begin{Bmatrix} 0 & x \le a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \le x \le b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \le x \le c \\ 0 & c \le x \end{Bmatrix} \quad (۳)$$

[1] Classical Set
[2] Trapezoidal Fuzzy Membership

$$f_{(x;a\ b\ c\ d)} = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (۴)$$

مثلثی[1] تابع با سه پارامتر {a b c} تعریف شده و برای هرکدام از توابع ایجاد با پارامترهای مورد نظر، دامنه‌های خاص تعریف می‌شود. تابع عضویت به‌صورت ریاضی بیان می‌شود، به‌طوری‌که می‌توان با استفاده از عملگرهای min و max نیز تعریف دیگری از آن داشت:

$$f_{(x;a\ b\ c)} = \begin{Bmatrix} 0 & x \le a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \le x \le b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \le x \le c \\ 0 & c \le x \end{Bmatrix} \quad (۵)$$

$$f_{(x;a\ b\ c)} = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (۶)$$

در معادله و ماتریس فوق، پارامترهای a b c مختصات گوشه‌های مثلث را بیان می‌کنند. برای محاسبات در مرحله بعدی، از عملگر زیر بهره‌گیری شده است.

$$\mu_{A\cap B}(x) = T\big(\mu_A(x), \mu_B(x)\big) = \mu_A(x) * \mu_B(x) \quad (۷)$$
$$\mu_{not\ A}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

۳-نتایج و بحث

۳-۱-نتایج حاصل از مدل ANFIS

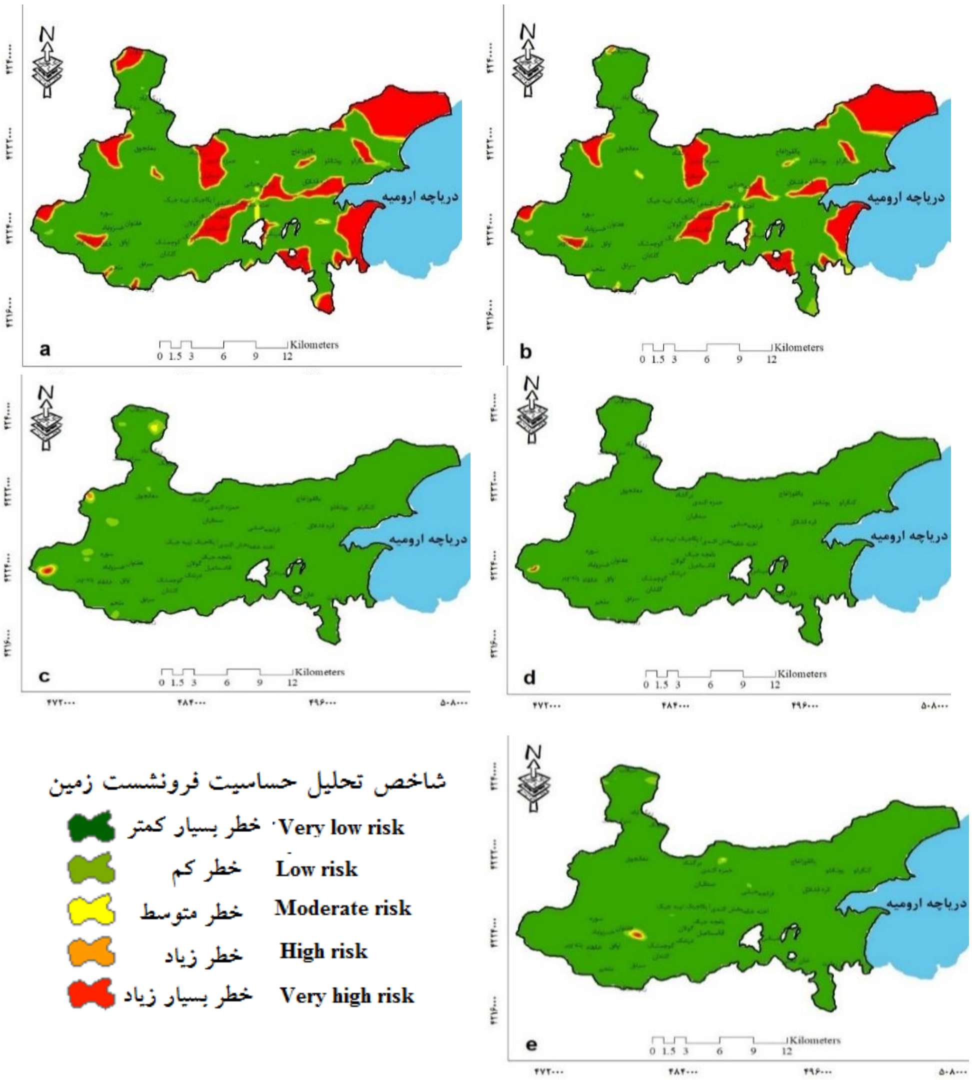
مدل سیستم استنتاج فازی عصبی با توابع عضویت مختلف، برای محدوده مطالعاتی انجام گرفت و نتایج به‌صورت شکل و نمودار ارائه گردید (شکل ۴ و ۳).

نتایج حاصل از مدل مذکور در توابع عضویت مختلف که در شکل ۴ و ۳ و جدول ۳، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که توابع عضویت ذوزنقه‌ای و مثلثی به ترتیب با ضریب خطا آموزشی 10^{-7} و 10^{-8}، ضریب خطای میانگین مربعات ۰.۱۸ و ۰.۲۰ همچنین با همبستگی رگرسیون ۰.۸۶ و ۰.۸۰ بهترین عملکرد را در شناسایی مناطق با حساسیت بالا فرونشست را داشته است.

بر اساس دو مدل فوق، مساحت ۸.۹ و ۶.۳ کیلومترمربع از منطقه در کلاس خطر بسیار زیاد و مساحت ۱.۸ و ۳.۲ کیلومترمربع، در محدوده خطر زیاد قرار دارند. در واقع نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند به‌طور مؤثر فرونشست در منطقه را با دقت بهتر و ضریب خطای 10^{-7} و 10^{-8} فرونشست را پیش‌بینی نماید. از مدل پیشنهادی به‌دست آمده می‌توان در سال‌های آتی با ترسیم و پیش‌بینی روند تغییرات آب‌های زیرزمینی به‌عنوان مدل پیش‌بینی مدیریتی استفاده کرد. شکل ۴، ضریب همبستگی رگرسیون خطی داده‌های

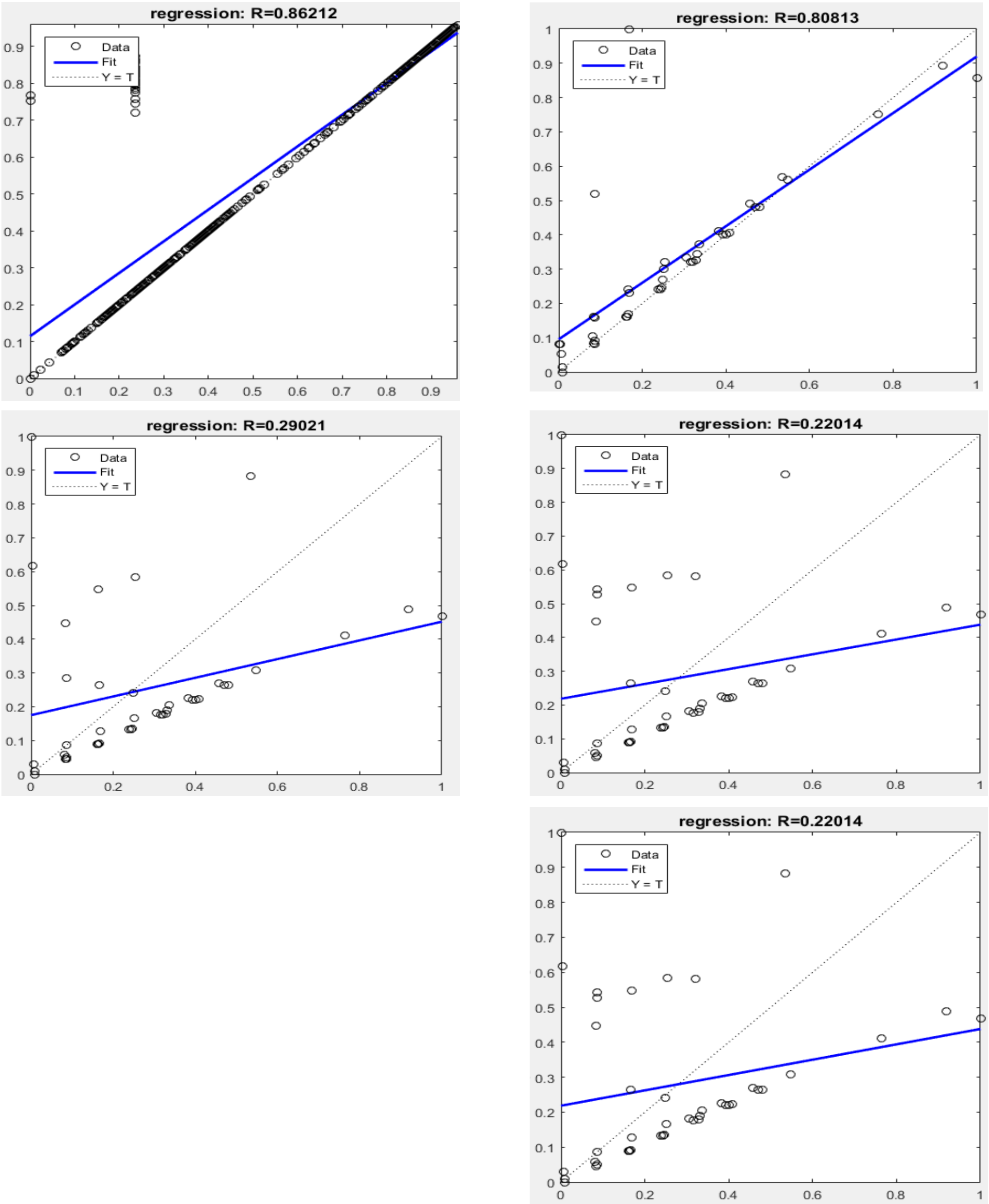
[1] Triangular Fuzzy Membership

به‌دست آمده از مدل استنتاج عصبی فازی را نشان می‌دهد که برابر با عدد 0.86 می‌باشد و نشان از عملکرد مناسب مدل سوگنو در ارتباط با بحران فرونشست در منطقه است.



شکل ۳- نقشه تحلیل حساسیت فرونشست، با استفاده از مدل ANFIS در پنج تابع عضویت به ترتیب: a تابع عضویت ذوزنقه‌ای، b تابع عضویت مثلثی، c تابع عضویت گوسی، d تابع عضویت گوسی دوطرفه، e تابع عضویت منحنی زنگوله

Fig.3. Map of subsidence sensitivity analysis, using ANFIS model in five best-fit membership functions: a trapezoidal membership function, b triangular membership function, c Gaussian membership function, d bilateral Gaussian membership function, e bell curve membership function



شکل۴- همبستگی رگرسیون داده‌های فرونشست به‌دست آمده از مدل استنتاج عصبی فازی: a تابع عضویت ذوزنقه‌ای، b تابع عضویت مثلثی، c تابع عضویت گوسی، d تابع عضویت گوسی دوطرفه، e تابع عضویت منحنی زنگوله.

Fig.4. Regression correlation of subsidence data obtained from fuzzy neural inference model: a trapezoidal membership function, b triangular membership function, c Gaussian membership function, d bilateral Gaussian membership function, e bell curve membership function

۳-۲- تغییرات در آب‌های زیرزمینی و فرونشست

محدوده مطالعاتی از سه آبخوان آبرفتی با نام‌های سلماس، قالقاچی و سیدان تشکیل شده است. همچنین علاوه بر این یک آبخوان کوچک نیز در اطراف روستای شکریازی قرار دارد. همه این آبخوان‌ها در محدوده مطالعاتی قرار دارند، به همین دلیل در این مطالعه، اطلاعات همه آبخوان‌ها جمع‌آوری و نهایتاً با نام دشت سلماس همه آن‌ها مطالعه شده‌اند. دشت سلماس حدود ۴۵۰ کیلومترمربع وسعت دارد. حدود ۴۰۰ کیلومتر از این دشت به‌عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شده است که تحت پوشش شبکه پیزومتری آب‌های زیرزمینی قرار دارد. تعداد ۳۹ حلقه چاه پیزومتری فعال وجود دارد که متوسط عمق آن‌ها ۴۵ متر است. ضخامت آبرفت‌ها در محدوده از ۲۰۰ متر تا ۲۵ متر متغیر می‌باشد. در دشت سلماس، رقوم منحنی‌های ایزوپیز بین ۱۴۷۵ متر در مخروط افکنه دره‌لی‌سو (روستای هدر، واقع در شمال دشت) ۱۴۸۵ متر در شمال غرب دشت (اراضی روستای ایان)، ۱۴۶۰ متر در مخروط افکنه دریک‌چای (اراضی تازه شهر واقع در غرب دشت) و ۱۳۹۵ متر در مخروط افکنه زولاچای واقع در جنوب غرب دشت، تا ۱۲۸۰ متر در شرق محدوده سلماس (اراضی خروجی دشت و مجاور دریاچه ارومیه) متغیر است. بدین معنی که روند منحنی‌های هم‌تراز آب زیرزمینی از مناطق شمال، غرب و جنوب غرب دشت به سمت مرکز و شرق دشت کاهش می‌یابد. در مناطق ورودی آب زیرزمینی دشت، جبهه‌های شمالی، شمال غربی، غربی و جنوب غربی، تحدب منحنی‌ها (که به سمت دشت است)، نشان‌دهنده تغذیه آبخوان توسط رودخانه‌های دره لی سو، در یک چای و زولاچای می‌باشد. این تحدب منحنی‌ها بلافاصله با حرکت به سمت مرکز دشت تغییر جهت داده و جهت جریان آب زیرزمینی را به سمت شهر سلماس و جنوب غرب آن (حوالی روستاهای هفتوان و خانقاه) نشان می‌دهند، که علت آن بهره‌برداری شدید (توسط چاه‌های عمیق) در این مناطق است.

در مناطق شرقی دشت، تحدب منحنی‌های هم‌تراز آب زیرزمینی، به سمت حاشیه دشت می‌باشد که درنتیجه جهت جریان آب زیرزمینی، به سمت رودخانه زولاچای بوده و نشان‌دهنده زهکشی مناسب در این ناحیه است. شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی، در شمال دشت (مخروط افکنه دره لی سو) ۱۹ در هزار، در شمال غرب دشت (اراضی روستای ایان) ۳۴ در هزار، در مخروط افکنه دریک‌چای (غرب دشت و اراضی

تازه شهر) ۱۹ در هزار و در مخروط افکنه زولاچای (جنوب غرب دشت) ۹ در هزار می‌باشد که با حرکت به سمت شرق دشت از میزان شیب هیدرولیکی کاسته شده و به ۶ در هزار در مرکز دشت و کمتر از ۳ در هزار، در خروجی دشت (شرق محدوده مطالعاتی) می‌رسد. منحنی‌های هم عمق دشت سلماس بر اساس نقشه هم عمق ماکزیمم سال ۱۳۹۴، نشان‌دهنده تغییر عمق سطح ایستابی در خروجی دشت، از ۱ متر (شمال شرق دشت، روبروی شهرک صنعتی) تا ۹۵ متر در مخروط افکنه دره‌لی‌سو (اراضی روستای هدر) می‌باشد. در نقشه عمق حداقل (۹۴) تغییر عمق سطح ایستابی در خروجی دشت، از ۲ متر (در شمال شرق دشت، روبروی شهرک صنعتی) تا ۱۰۴ متر در مخروط افکنه دره‌لی‌سو (اراضی روستای هدر) می‌باشد. آثار نشست زمین در برخی مناطق خروجی دشت (منطقه کلشان و قره قشلاق) مشاهده شده است. تمامی پیزومترهای حاشیه شرقی آبخوان سلماس که در مجاورت دریاچه ارومیه واقع شده‌اند و همچنین پیزومترهای حاشیه جنوبی دشت نظیر کلشان، اراضی علی‌آباد و آق‌زیارت در اثر پدیده فرونشست زمین، دچار رشد چاه یا لوله زایی شده که میزان این نشست مطابق آماره‌های موجود بین حداقل ۵ سانتی‌متر تا حداکثر ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد (در طی یک دهه).

جدول۴- مساحت و درصد، کلاس‌های توابع عضویت در محدوده موردمطالعه

Table 4- Area and percentage, classes of membership functions in the studied area

تابع **Function**	تابع عضویت و کلاس‌ها **Membership function and classes**	مساحت **Area**	درصد **Percentage**
تابع عضویت ذوزنقه‌ای Trapezoidal membership function	Very low risk خطر بسیار کمتر	32.2	73.5
	Low risk خطر کمتر	1.0	2.3
	Moderate risk خطر متوسط	1.2	2.8
	High risk خطر زیاد	0.8	1.8
	Very high risk خطر بسیار زیاد	8.6	19.6
تابع عضویت مثلثی Triangular membership function	Very low risk خطر بسیار کمتر	32.7	74.7
	Low risk خطر کمتر	2.0	4.6
	Moderate risk خطر متوسط	1.4	3.2
	High risk خطر زیاد	1.4	3.2
	Very high risk خطر بسیار زیاد	6.3	14.3

تابع عضویت گوسی Gaussian membership function	Very low risk خطر بسیار کمتر	43.1	98.4
	Low risk خطر کمتر	0.5	1.1
	Moderate risk خطر متوسط	0.1	0.3
	High risk خطر زیاد	0.1	0.1
	Very high risk خطر بسیار زیاد	0.03	0.1
تابع عضویت گوسی دو طرفه Two-way Gaussian membership function	Very low risk خطر بسیار کمتر	43.86	99.9
	Low risk خطر کمتر	0.03	0.1
	Moderate risk خطر متوسط	0	0
	High risk خطر زیاد	0.01	0.01
	Very high risk خطر بسیار زیاد	0.03	0.1
تابع عضویت زنگوله‌ای Bells membership function	Very low risk خطر بسیار کمتر	38.72	88.3
	Low risk خطر کمتر	4.09	9.3
	Moderate risk خطر متوسط	0.76	1.7
	High risk خطر زیاد	0.24	0.5
	Very high risk خطر بسیار زیاد	0.063	0.1



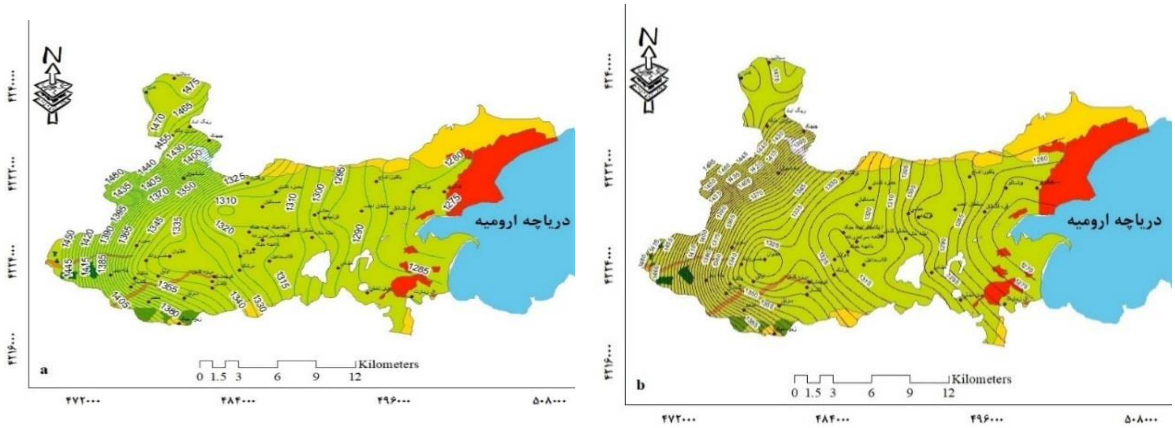
شکل۵-تصاویری از نشست زمین در بخش‌هایی از دشت سلماس

Fig. 5. Pictures of land subsidence in parts of Selmas plain

از دیگر پدیده‌های قابل‌توجه در این دشت مشاهده پدیده لوله زایی[1] در اطراف پیزومترهای تازه حفر شده و عدم مشاهده این عارضه در اطراف پیزومتر قدیمی می‌باشد (چاه پیزومتری یوشانلو) که علت این امر ناشی از ناقص بودن پیزومترهای قدیمی و عمق کم و نرسیدن به سنگ کف منطقه و در نتیجه نشست ساختمان پیزومتر همراه با نشست منطقه اطراف آن است. ولی در مورد پیزومترهای جدید الحفر با توجه به اینکه عمق آن‌ها زیاد بوده و تا سنگ کف منطقه حفر و لوله‌گذاری شده‌اند، در نتیجه اتکای لوله جدار به سنگ کف باعث شده در اثر نشست زمین ساختمان چاه دچار فرونشست نشده ولی پدیده لوله زایی در

[1] Tube formation

سطح زمین رخ دهد. ماسه دهی چاه‌های بهره‌برداری از دیگر پدیده‌های مرتبط با آب زیرزمینی در دشت سلماس است که در اغلب نقاط حاشیه شرقی دشت که جنس رسوبات ریزدانه می‌باشد. ملاحظه شده که خود این پدیده در افزایش میزان فرونشست زمین در این ناحیه می‌تواند مؤثر باشد. شکل ۶ و ۷ نشان‌دهنده افت دشت سلماس در محل پیزومتر روستای کلشان به میزان حدود ۱۵ سانتی‌متر و شکل ۸ نقشه‌های هم



عمق آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

شکل۶- نقشه ایروپیز حداکثر (**a**) و ایزوپیز حداقل (**b**)

Fig.6. Map of maximum isopiz (a) and minimum isopiz (b)



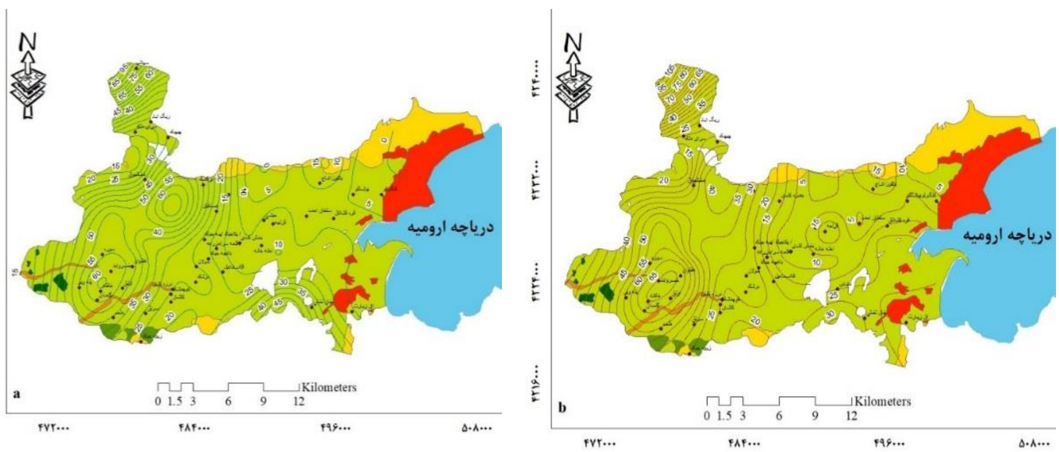
شکل۷- تصویر افت دشت سلماس در محل پیزومتر روستای کلشان و نشست زمین در دشت سلماس

Fig.7. The image of Selmas plain subsidence at the piezometer location of Kalshan village and land subsidence in Selmas plain

بررسی دوره چهل‌ویک‌ساله از سال آبی ۵۴–۵۳ لغایت ۹۴–۹۳ نشان می‌دهد که در طول این دوره، از سال آبی ۵۴–۵۳ لغایت ۷۴–۷۳، نوسانات سطح سفره حالت طبیعی داشته، به‌طوری‌که خشکسالی‌های اوایل دهه ۶۰ باعث افت حدود ۲ متر در سطح سفره آب زیرزمینی شده که با افزایش بارندگی در اواخر دهه ۶۰

و اوایل دهه ۷۰ این میزان جبران شده است. متأسفانه با شروع مجدد دوره خشکسالی، از سال آبی ۷۵-۷۴ و افزایش هم‌زمان میزان بهره‌برداری، افت شدید سطح سفره شروع شده که باعث صدور اولین آگهی ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از آب زیرزمینی برای قسمتی از دشت سلماس (مناطق ورودی دشت در غرب جاده ارومیه سلماس) در سال ۱۳۷۹ گردید. افزایش میزان بارندگی در اوایل دهه ۸۰ نیز نتوانست باعث جلوگیری از افت سطح سفره گردد، لذا در حال حاضر تمامی محدوده مطالعاتی سلماس ممنوعه اعلام شده است. در مجموع در طول دوره ۴۱ ساله (از ابتدای سال آبی ۵۴ - ۵۳ تا آخر سال آبی ۹۴-۹۳)، در مجموع ۱۸/۰۵ متر افت در سطح سفره آب زیرزمینی وجود داشته است که این رقم به‌طور متوسط معادل ۰/۴۴ متر افت سطح سفره در سال و در طول سال آبی ۹۴-۹۳ معادل ۱/۲۳ متر بوده است. با لحاظ نمودن ضریب ذخیره دشت (معادل ۳ درصد) و مساحت آبخوان (۳۹۸/۵۶ کیلومترمربع)، میزان کسری حجم مخزن سالانه دشت سلماس در طول سال آبی ۹۴-۹۳ و درازمدت ۴۱ ساله به ترتیب برابر ۱۵/۰۷ و ۲۱۵/۸۲ میلیون مترمکعب در سال برآورد می‌گردد.

بر اساس آخرین وضعیت منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی سلماس (بر اساس آخرین آماربرداری سال ۱۳۸۹ و بروز نمودن پروانه‌های صادره و تخلیه آن‌ها تا پایان سال آبی در شهریور ۹۴)، تعداد ۸۵۰ چاه عمیق و تعداد ۴۷۳ چاه نیمه عمیق در محدوده وجود دارد که با احتساب چشمه‌ها و قنات در سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ ۱۴۶.۱۸ میلیون مترمکعب آب از منابع زیرزمینی تخلیه شده است. آمار تخلیه در سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۰ ۱۶۴.۴۶ و در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ ۱۵۹ میلیون مترمکعب برآورد شده است (جدول ۶ و ۵).



شکل ۸- نقشه حداکثر هم عمق (a) و نقشه حداقل هم عمق (b)

Fig.8. Maximum equal depth map (a) and minimum equal depth map (b)

جدول۵- تعداد چاه و تخلیه سالانه منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی سال آبی (۹۳-۹۴)(اداره آب استان آذربایجان غربی

Table 5- Number of wells and annual discharge of underground water resources in the (study area of the water year (93-94) (Water Department of West Azarbaijan Province)

چاه Well				چشمه Spring		قنات Qanat	
چاه عمیق Deep Well		چاه نیمه عمیق Semi-deep well					
تعداد NUM.	تخلیه Discharge	تعداد NUM.	تخلیه Discharge	تعداد NUM.	تخلیه Discharge	تعداد NUM.	تخلیه Discharge
850	134.123	473	10.155	27	1.052	59	0.856
جمع کل تخلیه Total discharge				146.186			

جدول۶- وضعیت منابع آب در سنوات آماری (تخلیه بر حسب میلیون مترمکعب)

سال آماربرداری Year of survey	چاه Well		چشمه Spring		قنات Qanat		تخلیه کل Total discharge
	تعداد NUM.	تخلیه Discharge	تعداد NUM.	تخلیه Discharge	تعداد NUM.	تخلیه Discharge	
2001-2002	1093	160.65	25	1.57	57	2.24	164.46
2010-2011	1357	157.637	–	–	59	1.393	159.03

Table 6- Status of water resources in statistical years (discharge in million cubic meters)

تغییر ذخیره ثابت آبخوان که این متغیر در بیلان متعادل (جمع ورودی‌ها با جمع خروجی‌ها برابر باشد) حدود صفر است و در بیلان منفی برابر اضافه برداشت از ذخیره ثابت آبخوان می‌باشد که برای برقراری موازنه به کمک عوامل تغذیه می‌آید و چون اضافه بر حجم ذخیره جبران‌پذیر سالانه آبخوان می‌باشد، با علامت منفی نشان داده می‌شود. برخی از عوامل بیلان یا مستقیماً قابل‌اندازه‌گیری و یا قابل‌محاسبه می‌باشند. ولی به علت وجود عوامل متعدد تأثیرگذار بر بیلان آب زیرزمینی حتی با داشتن کامل‌ترین اطلاعات موردنیاز، باز هم محاسبه برخی عوامل بیلان امکان‌پذیر نیست و یا محاسبه آن بسیار مشکل است. با توجه به توضیحات فوق بیلان آب زیرزمینی دشت سلماس در جدول ۷ ارائه گردیده است.

جدول۷- بیلان آب زیرزمینی آبخوان‌های آبرفتی محدوده مطالعاتی دشت سلماس (ارقام بر حسب میلیون مترمکعب در سال است.)

Table 7- Underground water balance of alluvial aquifers in the Selmas plain study area. The figures are in millions of cubic meters per year (Dousti Rezaie, Zeinalzadeh, Besharat & Amirataee, 2022)

نام آبخوان آبرفتی Alluvial aquifer name	مساحت ناحیه بیلان (Km²)Area of Bilan District	**Input factors عوامل ورودی**						**Output factors عوامل خروجی**					
		جریان زیرزمینی ورودی Incoming underground flow	نفوذ از بارندگی Penetration from rainfall	نفوذ از جریان‌های سطحی Penetration from surface flow	نفوذ از پساب کشاورزی Penetration from agricultural wastewater	نفوذ از پساب شرب و صنعت Penetration from drinking and	جمع Total	تخلیه و برداشت (چاه و قنات، چشمه) wells and)Drainage and collection (Qanat, springs	جریان زیرزمینی خروجی Underground outlet flow	زهکشی آبخوان Aquifer drainage	تبخیر از آبخوان Evaporation from aquifer	جمع Total	تغییرات حجم ذخیره آبخوان Changes in aquifer storage volume
سلماس Salmas	**397**	**61.57**	**8.47**	**44.71**	**60.6**	**8.37**	**178.75**	**168.22**	**2.98**	**2.74**	**3.39**	**184.88**	**-6.3**

بر اساس جدول مذکور در حالت کلی و با در نظر گرفتن تمام عوامل ورودی جمع کـل آب وارد شـده بـه منابع آب زیرزمینی ۱۷۸.۷۵ میلیون مترمکعب است و در مقابل مقدار تخلیه از چاه، چشمه، تبخیر و زهکشـی ۱۸۴.۸۸ میلیون مترمکعب برآورد شده است و مقدار تخلیه بیشتر از مقدار تغذیه می‌باشد بنـابراین یـک رونـد منفی در بیلان آب‌های زیرزمینی در منطقه اتفاق افتاده است. قابل ذکر است که با وجود بارندگی بسیار کـم و تغییر اقلیم جبران آن مشکل می‌باشد. برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینـی دشـت سـلماس باعـث کـاهش فشار منفذی و افزایش تنش در رسوبات سست محدوده شده و لایه‌های آبدار (اکیفر) و لایه‌های نشتی (آکـی تارد) فشرده شده و به‌تدریج مقدمات نشست درسطح زمین فراهم شده اسـت. شـروع و ایجادمقـدمات بـرای نشست زمین ممکن است از دهه‌ها قبل صورت گرفته باشداما به لحاظ کندی عملکرد، ایـن پدیـده در مقطـع زمانی کوتاه قابل درک نباشد و زمانی این پدیده درک شود که کار از کار گذشته باشد، بـه همـین سـبب هـم پایش به موقع و ارزیابی این پدیده و اثرات مورفولوژیک ناشی از آن در بسیاری از مواقع بـا دقـت و صـحت امکانپذیر نیست؛ و این رخ داد در اغلب نواحی، زمانی مورد توجه قـرار مـی‌گیـرد کـه اثـرات مورفولـوژی و

اشکال سطحی و زیر سطحی را بروز نموده، و عامل تخریب و خسارت گشته است (Lashkaripour et al., 2009). برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی دشت زمانی که از ظرفیت ترمیمی منابع ترمیم پذیر (همچون آب) بیشتر شده و همچنین در سازنده‌ای رسوبی مستعد صورت گرفته، نرخ فرونشست تشدید شده است. این وضعیت در جایی که استخراج آب در سفره‌های آبدار ماسه‌ای متخلخل که به‌صورت میان لایه‌ای با لایه‌های آبدار رسی نفوذ ناپذیر قرار داشته‌اند، صورت گرفته، موجب فرونشست گسترده شده است.

۴-نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بررسی‌ها می‌توان گفت که در دشت سلماس، بر اساس محاسبات درازمدت سالانه، به‌طور میانگین منابع آب زیرزمینی ۰.۴۴ متر افت کرده است. همچنین دشت سلماس با مساحت ۳۹۸ کیلومترمربع و ضریب ذخیره ۳ درصدی، با متوسط کسری ۵.۲۶ میلیون مترمکعب و در کل در درازمدت (بازه ۴۱ ساله) با ۲۱۵.۸۲ میلیون مترمکعبی منابع آب‌های زیرزمینی مواجه شده است. در ۴۱ سال گذشته سطح سفره آب‌های زیرزمینی به میزان ۱۸ متر افت کرده است که این رقم در سال ۹۳-۹۴، ۱.۲۳ متر بوده است. با در نظر گرفتن اینکه منطقه مطالعاتی بیشتر از لایه‌های رسی و سیلتی تشکیل شده، در نتیجه برداشت بیش‌ازحد ترمیم از آب‌های زیرزمینی با کاهش ایستابی و خروج آهسته آب از بین لایه‌های خاک همراه بوده است که این عمل باعث فشرده شدن آبخوان و کاهش حجم فضای خالی شده است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفته که برداشت بیش‌ازحد از آبخوان‌های دشت سلماس موجب فرونشست در این دشت شده است. دستاورد حاصل از مدل سیستم استنتاج عصبی فازی نشان می‌دهد که توابع عضویت ذوزنقه‌ای و مثلثی به ترتیب با ۰.۸۶ و ۰.۸۱ درصد همبستگی رگرسیون نتیجه قابل‌اعتماد و اطمینان را ارائه می‌دهد و بر حسب این دو تابع عضویت به ترتیب، ۸.۶ و ۶.۳ درصد از مساحت کل منطقه در محدوده فرونشست با خطر بسیار زیاد قرار دارند. همچنین بر اساس نقشه تحلیل حساسیت ارائه شده، سواحل دریاچه ارومیه، کنگرلو، یالقوزآغاج، قره قشلاق، قزلجه، آقااسماعیل، خان تختی، آق زیارت، خانقاه و سیلاب با بحران فرونشست در آینده مواجه خواهند بود. برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی منطقه ازیک‌طرف و کاهش نزولات جوی و به‌تبع از آن کاهش تغذیه مخزن آب زیرزمینی از طرف دیگر، سبب گردیده که سطح آب زیرزمینی دشت به‌طور مستمر افت نماید. در سال‌های گذشته با افزایش استخراج آب مناطقی همچون خانقاه با تغییرات ۲ سانتی‌متری، هدر ۱.۹۴، میدان دواب ۱.۴۸، یوشانلو ۱، ایان ۱.۵، تازه شهر ۱.۵۹ و خان تختی با ۵ سانتی‌متر افت در سال مواجه هستند. در مناطق شمالی و شمال شرقی استخراج آب با ماسه‌های ریز همراه است که نشان از کاهش و تا حدودی اتمام آب زیرزمینی در همان عمق است و با اکتشاف چاه‌های عمیق با کاهش آب استخراجی و پدیده فشردگی آبخوان و گاهی لوله زایی (در مناطق خان تختی) شرایط را برای وقوع فرونشست هموارتر می‌کند. شایان ذکر است که دشت سلماس یک محدوده فعال از نظر تکتونیکی است، لذا وقوع پدیده فرونشست در این

منطقه اگر همراه با فعالیت تکتونیکی نیز باشد، می‌تواند آثار مخرب فاجعه باری به همراه بیاورد؛ بنابراین پایش نرخ و دامنه فرونشست و اندازه‌گیری تغییرات و اثرات مورفولوژیکی ناشی از آن در چنین مناطقی می‌تواند گام مؤثری در کنترل نسبی پدیده فرونشست باشد.

References

Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A., & Laczniak, R. J. (1999). Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, *27*(6), 483-486. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027%3C0483:STUADO%3E2.3.CO;2

Burbey, T. J. (2002). The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Hydrogeology Journal*, *10*, 525-538. http://dx.doi.org/10.1007/s10040-002-0215-7

Cassiani, G., & Zoccatelli, C. (2000). Subsidence risk in Venice and nearby areas, Italy, owing to offshore gas fields; a stochastic analysis. *Environmental & Engineering Geoscience*, *6*(2), 115-128. https://doi.org/10.2113/gseegeosci.6.2.115

Chen, C. H., Wang, C. H., Hsu, Y. J., Yu, S. B., & Kuo, L. C. (2010). Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan, Taiwan. *Engineering Geology*, *115*(1-2), 122-131. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.011

Dehghani, M., Rastegarfar, M., Ashrafi, R. A., Ghazipour, N., & Khorramrooz, H. R. (2014). Interferometric SAR and geospatial techniques used for subsidence study in the Rafsanjan plain. *American Journal of Environmental Engineering*, *4*(2), 32-40. http://dx.doi.org/10.5923/j.ajee.20140402.03

Dousti Rezaie, M., Zeinalzadeh, K., Besharat, S., & Amirataee, B. (2022). Effects of Management and Climate Scenarios on Groundwater Level Changes: Case Numerical Modeling Study in Salmas Plain Aquifer. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *16*(2), 280-293. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.2.2.1

Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F., & Rosen, P. A. (1998). Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research*, *34*(10), 2573-2585. https://doi.org/10.1029/98WR01285

Ganguli, M. (2011). Groundwater withdrawal and land subsidence: a study of Singur Block, West Bengal, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, *2*(2), 465-471. http://dx.doi.org/10.32545/encyclopedia202008.0011.v2

Jahed Armaghani, D., Hajihassani, M., Monjezi, M., Mohamad, E. T., Marto, A., & Moghaddam, M. R. (2015a). Application of two intelligent systems in predicting environmental impacts of quarry blasting. *Arabian Journal of Geosciences*, *8*, 9647-9665. https://doi.org/10.1007/s12517-015-1908-2

Jahed Armaghani, D., Hajihassani, M., Sohaei, H., Tonnizam Mohamad, E., Marto, A., Motaghedi, H., & Moghaddam, M. R. (2015b). Neuro-fuzzy technique to predict air-overpressure induced by blasting. *Arabian Journal of Geosciences*, *8*, 10937-10950. http://dx.doi.org/10.1007%2Fs00366-015-0410-5

Karimzadeh, S., & Matsuoka, M. (2020). Remote Sensing X-Band SAR Data for land subsidence and pavement monitoring. *Sensors*, *20*(17), 4751. https://doi.org/10.3390/s20174751

Lashkaripour, G., Ghafoori, M., & Rostami Barani, H. R. (2009). An investigation on the mechanism of earth-fissures and land subsidence in the western part of Kashmar Plain. *Scientific Semiannual Journal Sedimentary Facies*, *1*(1), 95-111. [In Persian] https://doi.org/10.22067/sed.facies.v1i1.697

Naderloo, L., Javadikia, H., & Mostafaei, M. (2017). Modeling the energy ratio and productivity of biodiesel with different reactor dimensions and ultrasonic power using ANFIS. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *70*, 56-64. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.035

Nilzad, M., Moradi, H., & Jalili, K. (2018). Estimation of Temporal and Spatial variations of the Level of the Aquifers in Bisotun Plain of Kermanshah Province with Geostatistical Methods. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, *8*(4), 79-92. [In Persian] https://www.waterjournal.ir/article_76950.html

Niroumandfar, F., khozeymehnehad, H., & Khashei Siuki, A. (2020). Investigating management and hydrogeological criteria on ground level changes in the plain of Sarayan. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, *10*(4), 210-228. [In Persian] https://doi.org/10.22125/iwe.2020.110087

Rajabi, M., & Bayati, K. M. (2011). Geomorphology of Northwest Iran. Tabriz: University of Tabriz. [In Persian].

Zarei, K., Rasoulzadeh, A., Seddighi, M., Ahmadzadeh, G., & Ramezani, J. (2020). Determination of the relationship between land subsidence and ground water level loss with radar interferometry and GPS station methods (Case study: Salmas Plain). *Journal of Irrigation and Water Engineering*, *11*(1), 168-182.[In Persian] https://www.waterjournal.ir/article_114960_en.html